Beeinflussung der Elektronensekundäremission einer Aluminium-Platte durch Licht

---

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der philosophischen Doktorwürde, vorgelegt der hohen philosophischen Fakultät der Universität Basel

von

Ernst Frey

aus Basel

BASEL
Buchdruckerei Emil Birkhäuser & Cie.
1928

Beeinflussung der Elektronensekundäremission einer Aluminium-Platte durch Licht

---

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der philosophischen Doktorwürde, vorgelegt der hohen philosophischen Fakultät der Universität Basel

von

Ernst Frey

aus Basel

BASEL

Buchdruckerei Emil Birkhäuser & Cie.

1928

Genehmigt von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der philosophischen Fakultät auf Antrag der Herren Professoren Dr. A. Hagenbach und Dr. H. Zickendraht.

Basel, den 6. Juli 1928.

Prof. Dr. A. L. Bernoulli.
Dekan.

Sonderabdruck aus Helvetica Physica Acta, I. Jahrgang, No 6, 1928

Beeinflussung der Elektronensekundäremission einer Aluminium-Platte durch Licht

von **E. Frey.**

(21. VII. 28.)

An einer nicht entgasten Al-Platte wird im Hochvakuum die Elektronensekundäremission gemessen. Lässt man gleichzeitig mit den Elektronen die integrale Strahlung einer Quarzquecksilberamalgamlampe auf die Platte fallen, so vermindert sich, mit wenigen Ausnahmen, die Sekundäremission um ca. 15%. Das Auftreten dieses Effektes lässt sich stets auf das Vorhandensein von Primärelektronen mit kleiner Geschwindigkeit (0 bis 10 Volt) zurückführen. Es scheint somit die Elektronenreflexion durch das Licht stark beeinflussbar zu sein.

Die Kurven der Sekundäremission, aufgetragen als Funktion der Primärelektronengeschwindigkeit, zeigen eine Verschiebung, wenn sie das eine Mal von kleinen zu grossen, das andere Mal von grossen zu kleinen Geschwindigkeiten aufgenommen werden. (Hysterese.) Durch Belichten der Platte verschieben sich diese Kurven, indem die höhere Sekundäremission schon bei einer kleineren Primärgeschwindigkeit einsetzt.

§ 1. Einleitung.

Die Sekundärelektronenemission an Metallen, hervorgerufen durch langsame Kathodenstrahlen, ist in der letzten Zeit von verschiedenen Forschern[1]) untersucht und die Abhängigkeit vom Gasgehalte der Metallplatte sichergestellt worden. Dabei zeigt die entgaste Platte eine geringere Sekundäremission. Eine Ausnahme bildet das Al, das sich jedoch infolge des niederen Schmelzpunktes nicht gut entgasen lässt. Die Sekundäremission nimmt mit steigender Geschwindigkeit der Primärelektronen stetig zu, wobei das Verhältnis von Sekundär- zu Primärelektronenstrom I_2/I_1 auch Werte grösser als 1 annimmt. Die Grösse der Sekundäremission ändert von Metall zu Metall und erreicht beim Al besonders hohe Werte (1,8).

Einen ersten Versuch, die Sekundäremission durch Belichten der Metallplatte zu beeinflussen, macht Langmuir[2]). Auf einen

[1]) H. E. Farnsworth: Phys. Rev. **20**, 358, 1922 (Angabe der älteren Literatur). Phys. Rev. **25**, 41, 1925. Phys. Rev. **27**, 413, 1926. R. L. Petry: Phys. Rev. **26**, 346, 1925. Phys. Rev. **28**, 362, 1926.

[2]) J. Langmuir: Science **58**, 398, 1923.

Cu-Zylinder, der mit einer Cs-Schicht belegt ist, treffen die Glühelektronen mit einer Geschwindigkeit von 60 Volt auf. An einem dazu koaxial gelagerten Zylinder mit positiver Aufladung kommen die Sekundärelektronen zur Messung. Die ganze Anordnung befindet sich im Hochvakuum. Beim Belichten der Cs-Schicht durch sichtbares Licht steigt die Sekundäremission auf den zehnfachen Wert, während der reine Photoeffekt nur $^1/_{100}$ dieser Zunahme beträgt. Langmuir deutet den Effekt so: durch das Licht werden die Cs-Atome angeregt. Damit wird die Bedingung der Elektronenreflexion erhöht. Für den Effekt ist wahrscheinlich das blaugrüne Licht ($\lambda = 5300$ AE) verantwortlich zu machen.

Eine Beeinflussung im gleichen Sinne findet Dember[1]). Hier treffen Elektronen mit kleiner Geschwindigkeit auf die Al-Platte, die sich in der Mitte eines Rundkolbens befindet. Die Sekundärelektronen werden von der versilberten Glaswand aufgefangen. Vor der Al-Platte befindet sich ein geerdetes Gitter, um die Raumladungen zu vernichten. Der Kolben wird evakuiert ($p < 10^{-5}$ mm Hg). Bei Belichtung mit einer Quarzquecksilberlampe tritt eine *Vergrösserung* der Sekundäremission ein, die den reinen Photoeffekt bis um das 140-fache übertrifft. Nach der Auffassung von Dember vermögen die Primärelektronen die Metallelektronen zu lockern. Erst mit Hilfe des Lichtes gelingt es, diese gelockerten Elektronen ganz heraus zu befördern. Selbst rotes Licht ist noch wirksam.

Es ist in dieser Arbeit zuerst versucht worden die Dember'schen Messungen zu wiederholen, um die Abhängigkeit des Zusatzstromes durch Belichtung als Funktion der Primärelektronengeschwindigkeit aufzunehmen. Bei den Versuchen mit der Dember'schen Röhre hat sich der Effekt nicht auffinden lassen. Eine zweite Röhre, die es erlaubt den Sekundärstrom einer Al-Platte in einem feldfreien Raume zu messen, gibt den Effekt im Sinne einer Verkleinerung der Sekundärelektronenemission. Nur in ganz wenigen Fällen und unter speziellen Verhältnissen ist der Effekt im Dember'schen Sinne aufgetreten. Das endgültige Ziel dieser Arbeit hat somit in der Bestimmung derjenigen Grössen bestanden, von denen der Beleuchtungseffekt in Richtung einer Verkleinerung der Sekundäremission abhängig ist.

Erst nach Abschluss dieser Messungen ist die Arbeit von Rudberg[2]) aufgefunden worden, die den Effekt im gleichen Sinne wie hier wiedergibt. Auf die Rudberg'schen Messungen wird im § 4 näher eingegangen.

[1]) H. Dember: Zs. f. Phys. **33**, 529, 1925.
[2]) E. Rudberg: Medd. f. Nobelinst. **6**, 9 S., 1925.

§ 2. Vormessungen und Apparatur.

An der ersten Röhre, die nach den Angaben von DEMBER[1]), mit Weglassung der Wandversilberung, konstruiert worden ist, kommen die Ströme, die eine Änderung der Sekundäremission anzeigen, zwischen Al-Platte und dem Gitter zur Messung. Dazu wird ein Deprez-d'Arsonval Galvanometer (Ausführung Siemens und Halske) verwendet (1 Skt = 4,16 10^{-10} Amp., Skalenabstand 4 m). Die Evakuierung der Röhre geschieht mittels einer Quecksilberdiffusionspumpe aus Stahl, die später durch eine Vollmer Pumpe ersetzt wird. Der Gasdruck beträgt ca. 10^{-4} mm Hg. Die Quecksilberdämpfe werden mit Kohlensäureschnee ausgefroren.

Unter diesen Bedingungen beträgt die Grösse des Photostromes an der aus technischem Al gedrehten Platte 10^{-9} Amp. Bei den Untersuchungen wird die Anodenspannung von 0 bis 200 Volt variiert. Das Gitter liegt direkt, die Platte über dem Galvanometer an Erde. Der zu erwartende Effekt muss sich bei Belichtung in einer Verminderung des Plattenstromes anzeigen. Diese Verkleinerung wird bei sämtlichen Anodenspannungen nie grösser gefunden als dem reinen Photostrom entspricht. Ein Verbinden von Anode, Platte und Gitter ermöglicht es, grössere Ströme auf die Platte zu bekommen, weil dadurch die Elektronen einen angenähert feldfreien Raum durchfliegen. Störungen, hervorgerufen durch Aufladung der Gefässwände, sind nicht bemerkt worden. Im Geschwindigkeitsgebiete der Primärelektronen von 0 bis 30 Volt *vergrössert* sich nun bei Belichtung der auf die Al-Platte zufliessende Strom. Diese Vergrösserung verschwindet über 30 Volt. Der Effekt nimmt grössere Werte an, je grösser der Primärstrom ist. Diese Abhängigkeit, sowie das trägheitslose Einstellen und Verschwinden des Zusatzstromes, weisen auf eine Raumladungszerstörung durch positive Ionen hin, die durch Belichtung erzeugt werden. Ein Zusatzstrom im Dember'schen Sinne ist an dieser Anordnung nicht auffindbar.

Um die an der ersten Röhre noch verwendeten Siegellackkittungen nach Möglichkeit zu vermeiden, sowie um einen definierteren Primärelektronenstrahl zu bekommen, wird eine neue Anordnung (Fig. 1) gebaut. Hier bedeutet *G* den Glühdraht. Dazu kommt ein 3 cm langer, 0,1 mm dicker unformierter Wolframdraht zur Verwendung, der zu einer Spirale von ca. 20 Windungen aufgerollt ist. Die Emission eines solchen Drahtes erweist sich als genügend konstant. Versuche mit einem Dullemitterdraht sind nicht befriedigend ausgefallen, da er auch nach längerem

[1]) H. DEMBER: l. c.

Überlasten Emissionsschwankungen gezeigt hat. Die Anode A aus Nickelblech dient zur Beschleunigung und Ausblendung der Primärelektronen. Der Aufsatz mit dem 3 mm langen Röhrchen R ist aus Al. Z bedeutet den Al-Zylinder, an dem die Sekundärelektronen zur Messung gelangen. Er trägt zwei Löcher, um den auf die Platte P auffallenden und von ihr reflektierten Lichtstrahl

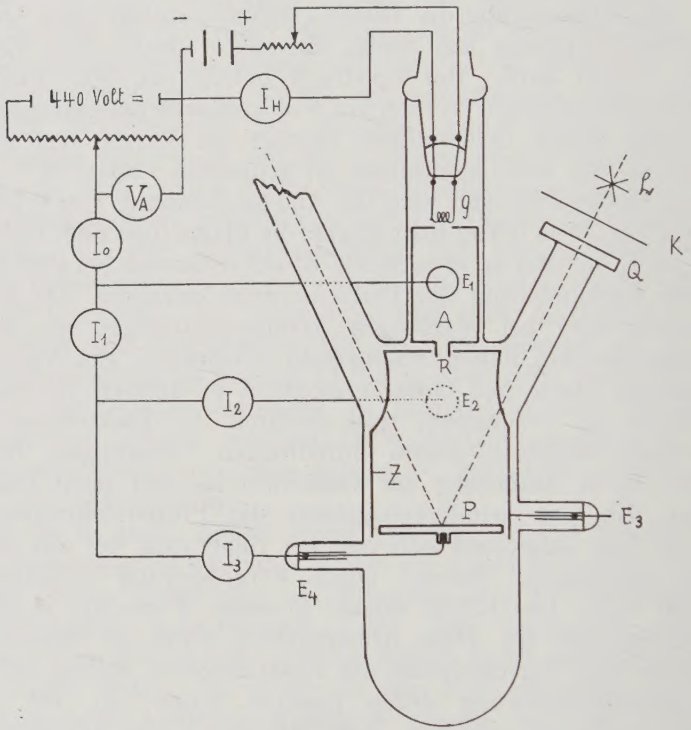

Fig. 1. Apparatur und Schaltschema.

hindurch zu lassen. Die Platte P ist aus technischem Al angefertigt und mittels eines Polierstahles auf Hochpolitur gebracht worden. Sämtliche Metallteile werden vor dem Einsetzen mit Alkohol und destilliertem Wasser, das Glasgefäss mit Chromsäure gereinigt. Die Träger der Metallbleche E_1 bis E_4 sind alle aus Cu angefertigt und haben an den Enden, wo sie ins Glas eingeschmolzen werden, kurze Pt-Drahtansätze. Die Einführungen E_1 und E_2 sind im Schema Fig. 1 als Kreise eingezeichnet, da sie senkrecht zur Zeichenebene stehen. Die Röhre hat zwei Ansatzrohre. Das eine trägt die Quarzplatte Q, die mit weissem Siegellack aufgekittet

ist, das andere nimmt den reflektierten Lichtstrahl auf und führt zum Pumpaggregat. Dieses besteht aus einer Gaede'schen Ölpumpe, die das Vorvakuum erzeugt. Für Mittel- und Hochvakuumstufe kommen eine Leybold'sche Quecksilberstrahlpumpe aus Glas und eine Vollmer-K-Pumpe zur Verwendung. Sie sind von der Röhre durch ein U-Rohr getrennt, das dauernd mit einem Kohlensäureschnee-Äthergemisch gekühlt wird. Zwischen diesem U-Rohr und den Pumpen ist ein Mac Leod'sches Manometer angeschmolzen, das bei sämtlichen Messungen zur Druckkontrolle dient. Seine Dimensionierung ist so, dass 1 mm Niveaudifferenz der Quecksilbersäulen in Kapillare und Steigrohr einem Druck von $p = 4.10^{-6}$ mm Hg entsprechen. Alle Messungen, in denen nicht gerade eine Druckabhängigkeit studiert wird, werden erst dann ausgeführt, wenn das Quecksilber in der Kapillare oben hängen bleibt, d. h. $p < 10^{-6}$ mm Hg. Versuche, einen positiven Ionenstrom, erhalten durch Stossionisation am Restgase, nachzuweisen, sind ergebnislos verlaufen. Nach den Angaben von Dunoyer[1]) ist bei solchen Messungen die Platte auf -22 Volt, Anode und Zylinder auf $+250$ Volt gehalten worden. Selbst bei höchster Empfindlichkeit des Galvanometers tritt kein Ausschlag auf.

Die verwendete Lichtquelle besteht aus einer Quarzquecksilberamalgamlampe von Heraeus. Die Stromstärke hat bei jeder Messung, bei einer Klemmenspannung von 24 Volt, 2,2 Amp. betragen. Es ist nur die integrale Strahlung verwendet worden. Dieselbe hat sich während der Dauer einer Messung als konstant erwiesen. Prüfungen der ausgestrahlten Energie mittels Thermoelement und Na-Photozelle haben während drei Stunden keine messbare Änderung ergeben. Das Quarzfenster der Röhre ist von der Lampe durch eine Klappe K getrennt. Diese kann vom Galvanometerfernrohr aus mittels einer Zugvorrichtung betätigt werden. Die Lichtstrahlen gelangen von der Lampe ohne Linsensystem durch das Quarzfenster auf die Al-Platte.

Die bei den Messungen verwendete Schaltung ist in Fig. 1 eingezeichnet. Als Bezugspunkt für die Anodenspannung wird der negative Pol der Heizbatterie gewählt. Eine Potentiometerschaltung ermöglicht es, die Geschwindigkeit der Primärelektronen V_A (Anodenspannung) von 0 bis 440 Volt zu variieren. Wie aus Fig. 1 zu ersehen ist, sind Anode, Zylinder und Platte auf gleichem Potential, was einen angenähert feldfreien Raum beim Fliessen der Ströme garantiert. Die gesamte Glühemission kommt im

[1]) L. Dunoyer: La technique du vide, S. 107, 1924.

Messinstrument I_0 zur Messung. Dazu wird ein empfindliches, geeichtes Drehspulinstrument von Siemens und Halske (1 Skt = 2,67 10^{-7} Amp.) verwendet. Der Heizstromkreis besteht aus einer Akkumulatorenbatterie (16 Volt), einem veränderlichen Widerstande und dem Ampèremeter I_H. Der Primär- und Sekundärstrom wird mit dem Galvanometer G[1]) gemessen. Ein Quecksilbernapfschalter ermöglicht es, das Galvanometer in drei verschiedene Stromkreise zu legen (I_1, I_2, I_3).

Es gelten die Beziehungen:

$$\left.\begin{aligned} I_1 &= I_a + I_r + I_d \\ I_2 &= I_r + I_s + I_d \\ I_3 &= I_a - I_s \end{aligned}\right\} \quad I_1 = I_2 + I_3$$

Darin bedeuten: I_a die Elektronen, die durch die Al-Platte abfliessen, I_d den Teil der durch das Röhrchen R hindurchfliegenden Elektronen, die direkt auf den Auffangzylinder Z fallen, I_r die an der Al-Platte echt reflektierten Primärelektronen und I_s die an ihr sekundär ausgelösten Elektronen. Die diffus reflektierten Elektronen, wie sie Becker[2]) eingeführt hat, sind zur Vereinfachung zu den sekundär ausgelösten gezählt worden. Eine getrennte Anführung ändert an der ganzen Betrachtung nichts Wesentliches. I_1 stellt somit den Elektronenstrom dar, der durch das Röhrchen R fliesst. Er ist im Geschwindigkeitsgebiete von V_A: 20 bis 150 Volt, bei konstantem Heizstrome angenähert eine Konstante, etwa $3^0/_{00}$ der Gesamtemission. Unterhalb 20 Volt nimmt er ab und ist für $V_A = 0$ auch gleich Null. Oberhalb 150 Volt steigt er leicht an. I_2 enthält die auf den Zylinder fallenden Elektronen. Ist $I_d = 0$, so gibt das Verhältnis $\gamma = I_2/I_1$ die reine *Sekundäremission*, bezogen auf den Primärstrom als Einheit. Es ist daher wichtig sich über die Grösse des Einflusses von I_d auf γ zu orientieren. Ein Strom I_d kann hervorgerufen werden durch:

1. Primärelektronen, die im Röhrchen R direkt auf den Zylinder reflektiert werden, oder durch an R sekundär ausgelöste Elektronen.
2. Reflexion der Primärelektronen am Restgase.
3. Ablenkung der Primärelektronen im Erdmagnetfelde.

Zu Punkt 1 lässt sich sagen, dass die Ausblendung des Primärstrahles insofern gut war, als sich auf der Platte im Laufe der Zeit ein scharf begrenzter Auftreffpunkt ausgebildet hat. Inwieweit das Restgas die Reflexion (Punkt 2) begünstigt, zeigt Tabelle 2 S. 11, für die Geschwindigkeiten $V_A = 20$ und 50 Volt, wo γ

[1]) Siehe S. 387.

[2]) A. Becker: Ann. d. Phys. **78**, 253, 1925.

mit abnehmendem Gasdruck von 0,657 auf 0,601 resp. 0,892 auf 0,843 fällt, während es für die grösseren Geschwindigkeiten bei den verschiedenen Drucken gleich bleibt. Betreffs Punkt 3 kann nach der Geschwindigkeit gefragt werden, die ein Elektron haben muss, um bei der Ablenkung im Erdmagnetfelde nicht mehr auf den Zylinder zu gelangen. Aus den Dimensionen des Apparates ergibt sich als Radius der Kreisbahn, die ein Elektron gerade auf den Rand der Al-Platte auftreffen lässt, 7 cm. Unter der Annahme,

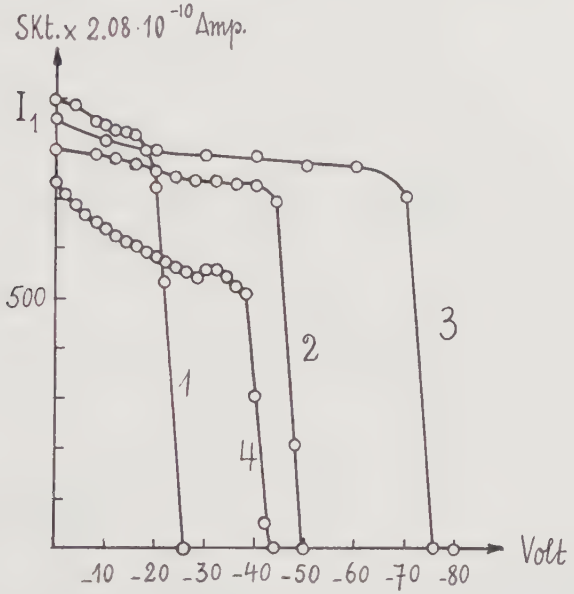

Fig. 2. Geschwindigkeitsverteilung der Primärelektronen.
1 $V_A = 25$ Volt; 2 und 4 $V_A = 50$ Volt; 3 $V_A = 75$ Volt.

dass das gesamte Erdfeld senkrecht auf der Geschwindigkeit steht, ergibt sich aus H = 0,45 Gauss, für den Radius als Funktion der Geschwindigkeit:

$$r = 7{,}4 \sqrt{V_A} \text{ cm}$$

d. h. alle aus R austretenden Primärelektronen, die eine Geschwindigkeit kleiner als 1 Volt haben, fallen direkt auf den Zylinder. Da bei grossen Heizstromstärken der positive Potentialabfall über dem Glühdraht bis zu 9 Volt beträgt, treten noch bei einer Anodenspannung von 10 Volt Elektronen auf, die eine Geschwindigkeit kleiner als 1 Volt besitzen. Im Primärgeschwindigkeitsgebiete

von 0 bis 10 Volt kann daher I_d beträchtliche Werte annehmen und lässt γ zu gross werden (bis 1,0), wie verschiedene Messungen gezeigt haben.

Einige Messungen, um über die Geschwindigkeitsverteilung der Primärelektronen Aufschluss zu haben, sind nach Schaltung IV Fig. 8 ausgeführt worden. Anode und Al-Platte sind auf positivem Potential, während der Zylinder negativ ist. Fig. 2 gibt für drei Geschwindigkeiten ($V_A = 25$, 50 und 75 Volt) die so gemessenen Verteilungskurven (Kurven 1, 2 und 3). Es ist I_1 als Funktion der negativen Zylinderspannung aufgetragen. Zwischen 0 und −10 Volt fallen die Kurven ziemlich rasch, um dann in einen flachen Teil überzugehen. Zum ersten Gebiete gehören die Primärelektronen, die auf die Wände des Röhrchens R aufgeprallt sind und nun mit einem Geschwindigkeitsverluste wegfliegen, oder Sekundärelektronen, die an R ausgelöst worden sind. Für die Primärgeschwindigkeiten 25 bis 200 Volt beträgt die Abnahme des Primärstromes bei einer Zylinderspannung von −10 Volt 5%, und es haben ungefähr 80% der Primärelektronen eine Geschwindigkeit, die zwischen V_A und $V_A - V_H$ liegt, wo V_H der Potentialabfall über dem Glühfaden bedeutet. Für die Aufnahme der Kurve 4 Fig. 2 sind Platte und Zylinder miteinander kurz verbunden und negativ gegenüber der Anode gemacht worden. V_A beträgt 48 Volt. Diese Kurve verläuft steiler als 2 und hört bei −44 Volt auf. Es macht sich bei dieser Schaltung ein gewisser Durchgriff durch die Anode bemerkbar. Nach einer kürzlich erschienenen Arbeit von Dalton und Baxter[1]) lässt sich die Zahl der Elektronen, die die ursprüngliche Geschwindigkeit beibehalten haben, durch Berussung der Anode auf 95% steigern. Da aber eine berusste Platte im Vakuum dauernd viel Gas abgibt, ist von dieser Behandlung der Anode abgesehen worden.

§ 3. Messresultate.

Die Elektronensekundäremission und ihre Beeinflussung durch das Licht ist an drei verschieden vorbehandelten Al-Platten studiert worden. Sie seien A, B und C genannt. Platte A ist die schon im § 2 erwähnte Al-Scheibe aus technischem Al. Durch Eintauchen von A in eine NaOH-Lösung erhält man Platte B. Sie hat somit einen Überzug von Na-Aluminat. Die Platte C trägt einen Belag von Cs-Cl, der durch Verdunsten einer alkoholischen Cs-Cl-Lösung auf einem gewöhnlichen Al-Stück erhalten

[1]) J. R. Dalton und W. P. Baxter: Phys. Rev. **29**, 248, 1927.

worden ist. Bevor die erste Messung zur Durchführung kommt, wird jede Platte mehrere Tage lang, mit Unterbrechung während der Nacht, mit 440 Volt-Elektronen bombardiert, bis das Manometer beim Einstellen des höchst zulässigen Primärstromes keine Gasabgabe mehr anzeigt.

a) Sekundäremission ohne Beleuchtung: In Fig. 3 ist für die drei verschiedenen Platten die Sekundäremission $\gamma = I_2/I_1$ als

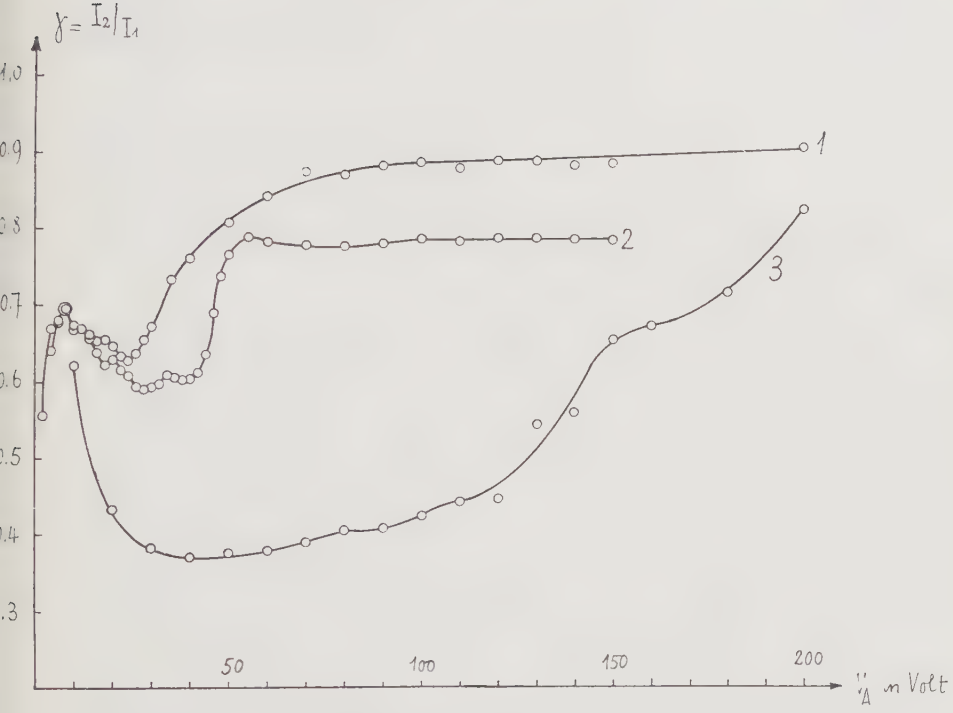

Fig. 3. Sekundäremission als Funktion der Primärgeschwindigkeit.
1 Platte A; 2 Platte B; 3 Platte C.

Funktion der Geschwindigkeit V_A der Primärelektronen aufgetragen. Die Messungen sind nach Schaltung Fig. 1 ausgeführt. Kurve 1 (Platte A) stellt das Mittel aus drei Messreihen dar. Bei 8 Volt befindet sich ein ausgeprägtes Maximum, während bei 24 Volt das Minimum liegt. Es folgt ein stetiger Anstieg bis 70 Volt, um dann bis auf 200 Volt konstant zu bleiben. Werte $\gamma > 1$ werden mit dieser Schaltung nicht erhalten. Im Kurvenstück 8 bis 20 Volt treten bei jeder Messung zwei kleine Maxima auf, denen eine gewisse Realität zuzuschreiben ist. Doch lassen sie

infolge der Unsicherheit der Bestimmung der Sekundäremission in diesem Geschwindigkeitsgebiete keine Deutung zu. Die Sekundäremission der Platte B (Kurve 2) deckt sich anfänglich mit Kurve 1. Das Minimum ist flacher, liegt tiefer und ist nach höheren Voltzahlen verschoben. Umso steiler ist der darauffolgende Anstieg. Oberhalb 60 Volt ist γ konstant. Ein ganz anderes Bild zeigt Kurve 3, erhalten mit Platte C. γ ist in einem grossen Gebiete auf die Hälfte gesunken. Das Minimum liegt wie in 2 bei 40 Volt. Der darauffolgende Anstieg ist flacher und unregelmässiger als bei den anderen Kurven. Auf letzteren Umstand soll weiter unten noch einmal zurückgekommen werden.

Die Sekundäremission als Funktion des Primärstromes ist für die Geschwindigkeiten $V_A = 50$, 100 und 150 Volt speziell an der Platte A untersucht worden. Durch Variation des Heizstromes von 0,7 bis 1,0 Amp. lässt sich die Zahl der primär auffallenden Elektronen im Verhältnis 1:30 vergrössern. Tabelle 1 gibt einige Resultate.

Tabelle 1.

$V_A = 50$ Volt			$V_A = 100$ Volt			$V_A = 150$ Volt		
$I_1 \cdot 2{,}08 \cdot 10^{-10}$ Amp.	$I_2 \cdot 2{,}08 \cdot 10^{-10}$ Amp.	$\gamma = \frac{I_2}{I_1}$	$I_1 \cdot 2{,}08 \cdot 10^{-10}$ Amp.	$I_2 \cdot 2{,}08 \cdot 10^{-10}$ Amp.	$\gamma = \frac{I_2}{I_1}$	$I_1 \cdot 2{,}08 \cdot 10^{-10}$ Amp.	$I_2 \cdot 2{,}08 \cdot 10^{-10}$ Amp.	$\gamma = \frac{I_2}{I_1}$
286	240	0,840	342	310	0,907	330	286	0,867
898	776	0,864	1280	1138	0,890	1416	1232	0,871
1692	1416	0,837	2060	1890	0,917	2750	2490	0,905
2170	1810	0,835	4820	4390	0,912	4840	4410	0,912
4530	3800	0,837	7280	6610	0,908	6490	5860	0,905
7120	5980	0,840	9160	8310	0,908	10600	9710	0,915
10550	8900	0,843						
Mittel: $\gamma = 0{,}842 \pm 0{,}004$			Mittel: $\gamma = 0{,}907 \pm 0{,}004$			Mittel: $\gamma = 0{,}896 \pm 0{,}009$		

Die Werte von γ stimmen auf wenige Prozente miteinander überein, sodass bei der Platte A die Proportionalität zwischen Sekundär- und Primärstrom für konstantes V_A als erfüllt angesehen werden darf. Versuche, auch an den beiden anderen Platten analoge Messkurven aufzunehmen, ergeben, dass γ sich mit I_1 ändert. Beim Vergrössern von I_1 um das Zehnfache weist z. B. bei einer Messung an der Platte B, γ für die Geschwindigkeiten 25,50 und 75 Volt, eine Abnahme um 25% auf, während für $V_A = 100$ Volt γ angenähert konstant bleibt.

Als wichtiges Ergebnis ist anzuführen, dass sich bei den Platten B und C eine ausgeprägte *Hysteresiserscheinung* zeigt,

indem an den Kurven: γ als Funktion von V_A, beträchtliche Abweichungen auftreten, wenn das eine Mal die Geschwindigkeit der Primärelektronen von 0 auf 150 Volt gesteigert, das andere Mal von 150 auf 0 Volt erniedrigt wird (steigende und fallende Voltzahlen). Fig. 4 illustriert ein solches Verhalten, wo γ als Funktion der Primärgeschwindigkeit aufgetragen ist. Hier sind die Kurven 1 (Platte B), 3 und 5 (Platte C) mit steigenden Voltzahlen, 2 (B), 4 und 6 (C) mit fallenden aufgenommen. Die Verschiebung von 2 gegen 1 beträgt ca. 40 Volt. Nach 2 kann das hohe Emissionsvermögen der Platte bis 48 Volt beibehalten werden

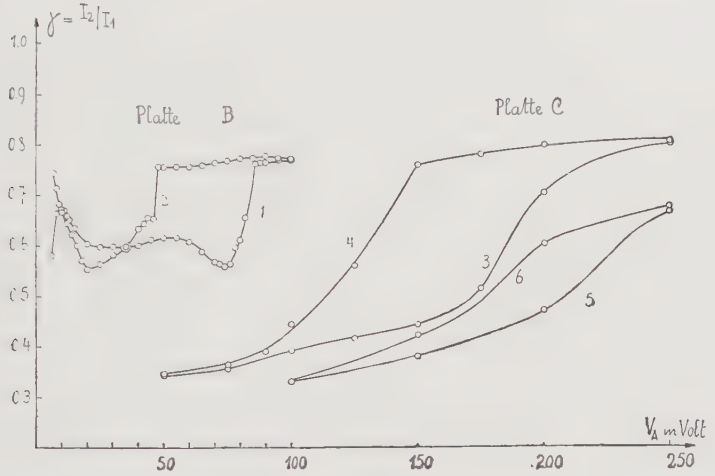

Fig. 4. Hysteresiserscheinung an den Platten B und C. 1,3 und 5 mit steigenden, 2,4 und 6 mit fallenden Voltzahlen aufgenommen.

und der darauffolgende Abfall ist ebenso steil wie der Anstieg bei 75 Volt in 1. Die Kurven überschneiden sich, doch entspricht dem Minimum bei 75 Volt (1) dasjenige bei 20 Volt (2). Sie stimmen auch dem Absolutwerte nach überein, was durch jede ausgeführte Messung bestätigt worden ist. In Kurve 2 setzt bei kleinen Geschwindigkeiten eine starke Reflexion der Elektronen ein. Wird beim Aufnehmen dieser Kurve bei der Geschwindigkeit 52 Volt angehalten, so ergibt die Ablesung am Galvanometer noch nach einer Stunde den gleichen Wert für γ. Auch das Einstellen einer niederen Geschwindigkeit (zwischen 40 und 50 Volt) für die Dauer einer Sekunde, ändert nach dem Zurückstellen an γ nichts. Werden jedoch die 40 Volt unterschritten, so stellt sich γ für 52 Volt auf einen Wert ein, der etwas über der Kurve 1 liegt.

Ein Vergleich der Kurven 2 in Fig. 3 und 1 in Fig. 4 zeigt das Verschieben des Anstieges von γ zu grösseren Voltzahlen. Da beide mit steigenden Voltzahlen aufgenommen sind, ist diese Verschiedenheit dem Entgasungszustande oder einer Oberflächenveränderung durch das Elektronenbombardement zuzuschreiben. Die Platte hat im Falle 1, Fig. 4, länger im Vakuum gestanden. Dieselbe Erscheinung tritt auch an Platte 6 auf. Die Kurven 5 und 6 zeigen gegenüber 3 und 4 eine Verschiebung nach rechts und entsprechen einem besser entgasten Zustande. Die Hysteresis lässt sich auch hier deutlich nachweisen. Die Fläche, die durch die Kurven der steigenden und fallenden Voltzahlen begrenzt wird, vermindert sich mit steigender Entgasung. Über 150 Volt sind die Zustände auf den unteren Kurven nicht so stabil wie auf den entsprechenden an der Platte *B*. Erst nach einem Warten von 2 bis 3 Minuten stellt sich der Grenzwert ein. Dieser ist in Fig. 4 eingetragen. In Fig. 3 ist der Endzustand nicht abgewartet worden, deshalb liegen die Punkte längs der ausgezogenen Kurve so unregelmässig verteilt. Auch an Platte *A* lässt sich die Hysterese nachweisen. In Richtung der Geschwindigkeitsachse sind die Kurven um ca. 40 Volt verschoben, während in der anderen Richtung γ von 0,8 auf 0,9 steigt. Die Fläche ist hier kleiner als an der Platte *B*. Bei diesen Messungen hat die Platte *A* ein halbes Jahr dauernd unter Vakuum gestanden.

Da für spätere Betrachtungen eine Orientierung über die Geschwindigkeitsverteilung der Sekundärelektronen von Wichtigkeit ist, sind einige Messungen nach Schaltung IV, Fig. 8, ausgeführt worden. Fig. 5 gibt die drei gefundenen, typischen Kurven der Platte *A*. Als Abszisse ist die negative Spannung des Zylinders V_Z, als Ordinate die Sekundäremission γ aufgetragen. Kurve 1 (Primärgeschwindigkeit V_A 200 Volt) schneidet die Spannungsachse bei -30 Volt, d. h. die Sekundärelektronen gehören hier einem Geschwindigkeitsgebiete von 0 bis 30 Volt an und sind daher echt sekundär ausgelöste Elektronen. Dass oberhalb 30 Volt die Werte negativ werden, ist auf die Mängel der Apparatur zurückzuführen. Es handelt sich hier um eine Sekundäremission am Zylinder, hervorgerufen einmal durch Primärelektronen, die direkt auf ihn fallen, oder durch an der Al-Platte reflektierte Elektronen. Die Verteilung für die echte Reflexion der Primärelektronen zeigt Kurve 2 für $V_A = 25$ Volt. Der Abfall bis -15 Volt ist weniger steil als in 1, verläuft aber in der Nähe der Endgeschwindigkeit sehr rasch, was für den Reflexionsvorgang charakteristisch ist. Die Kurve 3 für $V_A = 50$ Volt, schliesst sich zwischen 0 und -20 Volt der Kurve 1 an. Es setzt hierauf ein Anstieg

mit einem scharfen Maximum bei −25 Volt ein. Ein solches Maximum tritt auch in einigen Messungen bei $V_A = 25$ und 75 Volt (Kurve 4) auf. Als Erklärung lässt sich etwa folgendes angeben: durch das angelegte Gegenfeld wird der Primärstrahl eingeengt und die Elektronendichte im Auftreffpunkt der Platte vergrössert, was infolge der Temperaturerhöhung eine Veränderung der Oberflächeneigenschaften in dem Sinne bewirkt, dass die Sekundäremission erhöht wird. Für $V_A = 50$ Volt tritt das Maximum bei sämtlichen vier ausgeführten Messungen auf, während es für

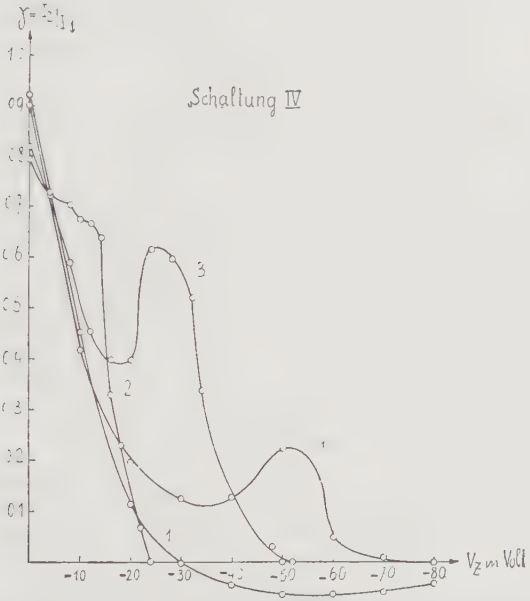

Fig. 5. Geschwindigkeitsverteilung der Sekundärelektronen.
1 $V_A = 200$ Volt; 2 $V_A = 25$ Volt; 3 $V_A = 50$ Volt; 4 $V_A = 75$ Volt.

$V_A = 25$ und 75 Volt nur da erscheint, wo der Primärstrom gross ist. ($2 \cdot 10^{-7}$ Amp.). Beträgt er nur die Hälfte, so bleibt das Maximum aus. Es spricht dies ganz für die oben gegebene Erklärung, wobei allerdings eine Störung, hervorgerufen durch Raumladungen, nicht ausgeschlossen ist.

b) Sekundäremission mit Beleuchtung: Nach dem Schaltschema in Fig. 1 lässt sich eine Änderung der Sekundäremission bei Belichtung mittels der Ströme I_2 und I_3 nachweisen. Unter dem Zusatzstrom Δ sei verstanden:

$$\Delta = I_3^* - I_3 = I_2 - I_2^* ,$$

wobei I_2^* und I_3^* die Ströme mit Belichtung bedeuten. Δ wird daher *positiv* gezählt, wenn die Sekundäremission *verkleinert* wird. Mit wenigen Ausnahmen ist Δ in diesem Sinne aufgefunden worden. Ein Beleuchtungseffekt tritt nur an den Platten A und B auf. An letzterer ist er schon bei der ersten Messung nach dem Einsetzen in die Röhre konstatiert worden, während er sich an A erst zeigt, nachdem die Platte bereits einen Monat lang im Vakuum gestanden hat. Anfänglich klein, ist er auf Werte gestiegen, die sich galvanometrisch gut haben messen lassen und beträgt im günstigsten Falle 15% der Sekundäremission. Die Platte C mit dem Cs-Belag lässt auch nach längerem Bombardieren und Stehen-

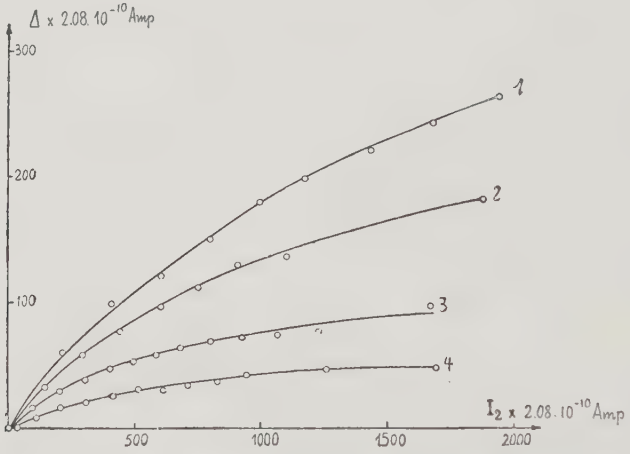

Fig. 6. Beleuchtungseffekt als Funktion des Sekundärstromes. 1 bis 3 ohne, 4 mit Glasplatte. $V_A = 100$ Volt.

lassen im Vakuum nicht eine Andeutung des Effektes erkennen. Wie sich aus den Messungen an A und B ergeben wird, ist Δ einem komplizierten Vorgange an der Oberfläche zuzuschreiben. Da sich diese Oberflächen stets verändern, ist es nicht möglich, an verschiedenen Tagen die Werte für Δ auch quantitativ zu reproduzieren. Die Abweichungen betragen bis 20% und werden jeweils angegeben.

In Fig. 6 ist für konstante Primärgeschwindigkeit ($V_A = 100$ Volt), Δ, ermittelt an Platte A, als Funktion des Sekundärstromes I_2 aufgetragen. Dabei beträgt für die Kurven 1, 2 und 3 der Abstand der Lichtquelle von der Platte 153,175 und 220 mm. Es nimmt für konstante Lichtintensität Δ mit I_2 zu und geht einem Sättigungswert entgegen. Der erste Anstieg ist für grosse

Intensitäten (Kurve 1) nahezu proportional I_2. (Bei einer Messung tritt strenge Proportionalität auf.) Für die Geschwindigkeiten $V_A = 25{,}50$ und 150 Volt ergibt sich ein entsprechender Kurvenverlauf.

Schaltet man in den Strahlengang ein 2 mm dickes Fensterglas, so sinkt Δ für $V_A = 100$ Volt auf $^1/_5$ (Kurve 4). Diese Veränderung deckt sich mit der Abnahme der Lichtenergie, wie eine Messung mit dem Thermoelement zeigt. Die Glasplatte absorbiert von 3200 AE alles Licht und ist auch im Ultrarot, nach den Messungen von Rubens[1]), undurchlässiger als Quarz. Welches von den beiden Gebieten nun für die Verminderung von Δ verantwortlich zu machen ist, lässt sich nach diesen Messungen nicht entscheiden. Die Untersuchungen an der Platte B haben hingegen gezeigt, dass mit davorgeschaltetem Glase Δ immer Null wird. Ohne Glas beträgt Δ nur den dritten Teil vom Effekt an der Platte A.

Einige Messungen an Platte A, wo der Einfluss des Gasdruckes auf Δ studiert wird, sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Δ erweist sich für fünf Geschwindigkeiten gemessen, als vom Gasdrucke unabhängig. Die kleinen Schwankungen liegen innerhalb der Reproduzierbarkeit der Δ-Ströme. Zu den höheren Drucken $p = 1{,}1\ 10^{-3}$ mm und $p = 3{,}2\ 10^{-4}$ mm in Tab. 2) gelangt man

Tabelle 2.

V_A (Volt)	$p = 1{,}1 \cdot 10^{-3}$ mm		$p = 3{,}2 \cdot 10^{-4}$ mm		$p < 10^{-6}$ mm	
	γ	Δ (Stk.)	γ	Δ (Stk.)	γ	Δ (Stk.)
150	0,900	25	0,905	25	0,909	25
100	0,898	23	0,905	27	0,900	25
75	0,894	24	0,895	27	0,894	24
50	0,892	24	0,893	26	0,843	24
20	0,657	0	0,613	0	0,601	0

am einfachsten durch Abschliessen der Röhre vom Pumpaggregat. Durch heftiges Elektronenbombardement der Platte gelingt es den Druck zu erhöhen. Die angegebenen Zahlen von γ und Δ sind Mittelwerte aus zwei Einstellungen. Ein Ausschalten der Kohlensäurekühlung bewirkt ebenfalls keine merkliche Änderung

[1]) H. Rubens, Wied. Ann. **45**, 260, 1892.

von Δ, sodass also der Gasdruck für die Entstehung des Beleuchtungseffektes nicht verantwortlich gemacht werden kann.

Es gilt nun zu untersuchen, inwieweit die Eigenschaften der Al-Platte den Beleuchtungseffekt bedingen. Wird an einem Tage Δ drei Mal als Funktion des Sekundärstromes für z. B. $V_A = 100$ Volt aufgenommen, wobei zwischen jeder Messreihe eine Stunde lang gepumpt wird, unter Herabsetzung des Primärstromes auf Null, was durch Ausschaltung der Anodenspannung geschieht, so erhält man Messpunkte, die gut auf einer Kurve liegen. Die maximalen Abweichungen betragen 10%. Diese Ergebnisse geben ein Mass für die Reproduzierbarkeit des Δ-Effektes. Eine Ermüdungserscheinung lässt sich während eines Tages nicht nachweisen. Wird in den Pausen zwischen den Messreihen die Al-Platte ca. eine Stunde lang mit 220 Volt-Elektronen bombardiert, so weisen auch da die Δ-Werte Abweichungen auf, die 10% nicht übersteigen, d. h. durch kurz andauerndes Elektronenbombardement ändern sich Oberfläche und Entgasungszustand der Platte A nicht. Dass hingegen ein Vorbehandeln der Platte mit NaOH (Platte B) und CsCl (Platte C) den Δ-Effekt herabsetzt resp. ganz unterdrückt, ist bereits erwähnt worden.

Für nicht allzugrosse Sekundärströme ist nach Fig. 6 Δ proportional I_2 (V_A = konst.). Um nun Δ in Abhängigkeit der Primärelektronengeschwindigkeit aufzunehmen, erscheint es deshalb zweckmässig, I_2 konstant zu halten. Damit werden die Δ-Werte direkt miteinander vergleichbar. In Fig. 7 sind die Ergebnisse zusammengestellt. In den Kurven 1 und 2 sind für die Platte A γ und Δ als Funktion von V_A aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass beide analoges Verhalten aufweisen. Trägt man nun Δ in Abhängigkeit von γ auf, so ergibt sich eine Gerade, wie die Kurve 3 zeigt. Diese lineare Beziehung hat jedoch nur in einem beschränkten γ-Intervall Gültigkeit, da die Gerade nicht nach dem Nullpunkt des Koordinatensystems hin gerichtet ist, was verlangt werden muss, da für $\gamma = 0$ auch $\Delta = 0$. Diese Gesetzmässigkeit ist an weiteren vier Messungen bestätigt worden. Die Übereinstimmung der Δ-Werte innerhalb einer Kolonne der Tabelle 2 lässt sich nun ohne weiteres verstehen, da auch die γ-Grössen unter sich gleich sind (ausgenommen für $V_A = 20$ Volt).

Auch im Gebiete $V_A = 10$ bis 20 Volt steigt Δ jedesmal an, sobald sich γ vergrössert. Sehr deutlich entspricht jeweils dem Minimum von Δ das Minimum von γ (bei ca. 30 Volt). Dem Absolutwerte nach ist Δ für gleiches γ bei kleinen Geschwindigkeiten grösser als bei höheren, wie aus Tabelle 3 zu ersehen ist.

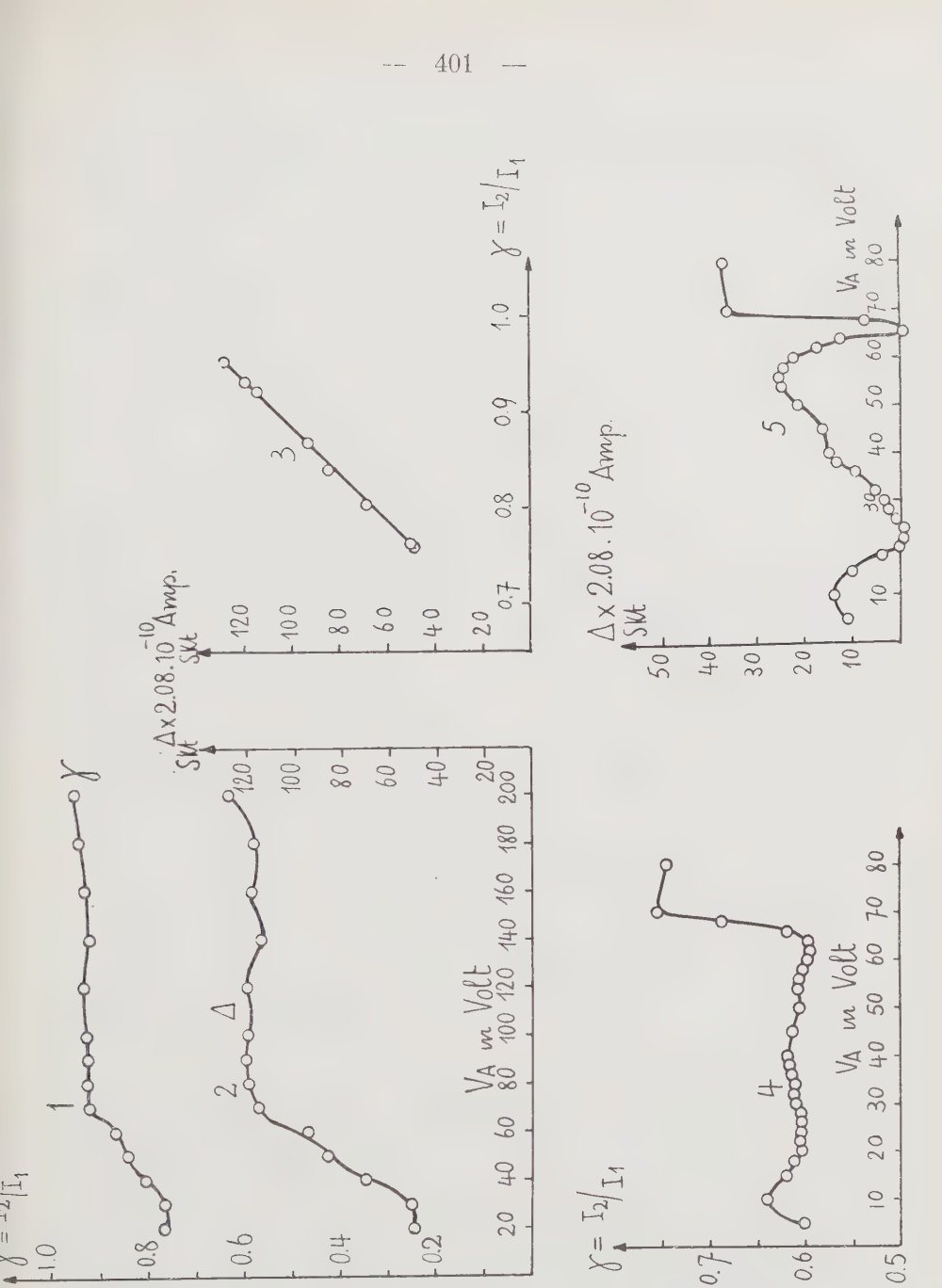

Fig. 7. Beleuchtungseffekt als Funktion der Primärgeschwindigkeit.
1 bis 3 an Platte A; 4 und 5 an Platte B.

Tabelle 3.

V_A (Volt)	γ	Δ $2{,}08 \cdot 10^{-10}$ Amp.
10	0,888	117
20	0,768	61
30	0,742	32
40	0,806	74
50	0,835	77
60	0,910	95

γ hat für $V_A = 10$ und 60 Volt ungefähr den Wert 0,9, während Δ für die grössere Geschwindigkeit um 20% kleiner ist. Es sagt dies aus, dass die Sekundäremission der Primärelektronen, die mit kleiner Geschwindigkeit (10 Volt) auf die Platte treffen, sich durch die Belichtung stärker beeinflussen lässt, als die bei grossen Geschwindigkeiten (60 Volt). I_2 ist in beiden Fällen gleich und beträgt 1,48 10^{-7} Amp. An der Platte B ist die Abhängigkeit des Zusatzstromes Δ von der Primärgeschwindigkeit etwas komplizierter und wird in Fig. 7 in den Kurven 4 und 5 dargestellt. Für die Geschwindigkeiten 0 bis 100 Volt ist in 4 γ ohne Belichtung, in 5 Δ als Funktion von V_A aufgetragen. Die Δ-Werte sind ihrem Absolutwerte nach nicht miteinander vergleichbar, da I_2 nicht konstant gehalten worden ist. Unabhängig davon sieht man, dass Δ für zwei Gebiete Null wird, und zwar einmal da, wo die echte Elektronenreflexion (bei 25 Volt) auf Kosten der diffusen Reflexion zurückgeht, das andere Mal an der Stelle, wo die γ-Kurve den raschen Anstieg aufweist, d. h. wo die echte Sekundäremission überwiegt. Für die kleinen Geschwindigkeiten (5 bis 10 Volt) weisen die Δ- und γ-Kurven parallelen Gang auf. Ein kleines Maximum liegt bei 10 Volt.

Es wird ferner durch Anlegen von Hilfsspannungen zwischen Platte und Zylinder versucht Δ zu beeinflussen. Dabei kommen die in Fig. 8 gezeichneten vier Schaltungen zur Anwendung. Als Spannungsquelle dient eine Akkumulatorenbatterie von 80 Volt, an der die Spannung von zwei zu zwei Volt abgreifbar ist. Aus den Schaltschemen Fig. 8 ist ersichtlich, dass in I und II die Primärgeschwindigkeit beeinflusst, und zwar in I vergrössert, in II verkleinert, wird. Schaltung III und IV lassen kein Primärelektron auf die Platte fallen, das nicht wieder seine ursprüngliche Geschwindigkeit erreicht hat. Fig. 9 zeigt die Kurven für die Platte A

in den Fällen I und II. Die Anodenspannung beträgt 50 Volt. Die Kurven mit ○ stellen die Verhältnisse $I_2/I_1 \cdot 1000$ und $I_3/I_1 \cdot 1000$ als Funktion der Plattenspannung dar. Beim Herabsetzen der

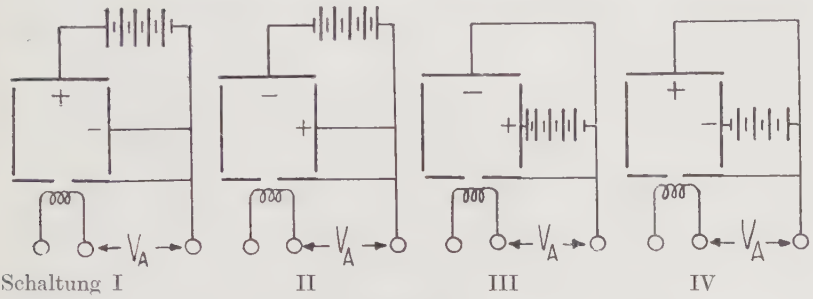

Fig. 8. Schaltschemen I bis IV.

Plattenspannung V_P im Falle II beginnt die Sekundäremission zu steigen. Dieser Anstieg lässt sich auf zwei Einflüsse zurückführen. Einmal befinden sich im Primärstrahle immer Elektronen

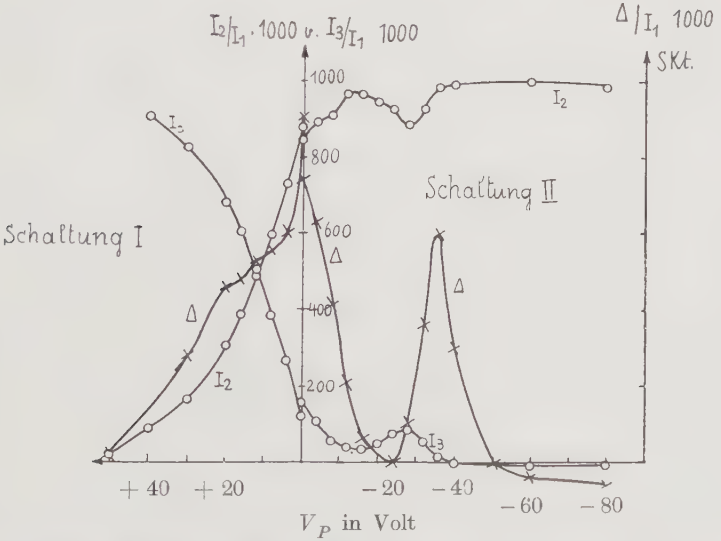

Fig. 9. Sekundäremission und Beleuchtungseffekt als Funktion der Plattenspannung V_P an Platte A. (Schaltung I und II.)

mit kleiner Geschwindigkeit, die durch die negativ geladene Platte auf den Zylinder direkt abgelenkt werden. Andererseits können die an ihm ausgelösten Sekundärelektronen die Platte nicht

mehr erreichen. Bei −15 Volt hat $I_2/I_1 \cdot 1000$ ein Maximum und geht durch ein Minimum bei −29 Volt, was einer Primärgeschwindigkeit von 50 − 29 = 21 Volt entspricht. Nach Kurve 1, Fig. 3, liegt aber an dieser Stelle für die Sekundäremission ein Minimum vor. Nachher steigt sie in Richtung kleinerer Geschwindigkeiten wieder rasch an, was sich auch in Fig. 9 bemerkbar macht. Allerdings kann dieser Anstieg hier auch dadurch erklärt werden, dass der immer stärker positiv aufgeladene Zylinder die Primärelektronen direkt auf sich zieht. Für die positive Platte (Fall I) fällt $I_2/I_1 \cdot 1000$ rasch ab, was zum Ausdruck bringt, dass die Sekundärelektronen, die an ihr entstehen, nicht mehr auf den negativen Zylinder fallen können. $I_2/I_1 \cdot 1000$ wird nie Null. Das sagt aus, dass es immer Primärelektronen gibt, die durch irgend eine Reflexion an der Anode direkt auf den Zylinder gelangen, oder dass unter den Sekundärelektronen stets echt und diffus reflektierte vorhanden sind, die das Gegenfeld des Zylinders zu durchlaufen vermögen. Bei der Plattenspannung $V_P = 0$ (Fig. 9) fallen die Kurvenpunkte für die Sekundäremission und auch für den Beleuchtungseffekt nicht zusammen. Da die Kurven mit positiv und negativ aufgeladener Platte an verschiedenen Tagen ausgeführt worden sind, ist eine vollständige Übereinstimmung nicht erhältlich. In den Fällen I und II macht die Kurve $I_3/I_1 \cdot 1000$ die Schwankungen der anderen mit. Als Summe ergibt sich stets 1000.

Die Δ-Kurve ist in Fig. 9 mit × eingezeichnet. Die Δ-Grössen, gewonnen als Mittelwerte aus Zu- und Abnahme von I_3 resp. I_2 sind ebenfalls auf den gleichen Primärstrom 1000 bezogen. Im Falle II zeigt der Verlauf der Kurve, dass eine Abnahme von Δ stets mit einer Abnahme der Zahl derjenigen Elektronen verbunden ist, die mit kleiner Geschwindigkeit auf die Platte fallen (Primärelektronen oder am Zylinder reflektierte und sekundär ausgelöste Elektronen). Für kleine Primärgeschwindigkeiten nimmt Δ entsprechend der Erhöhung der Sekundäremission zu, was sich nun auch hier in der Δ-Kurve im Maximum bei −36 Volt ausdrückt. Die kleinen negativen Werte im Gebiete −50 bis −80 Volt sind in der Grössenordnung des reinen Photoeffektes an der Platte. Für den Fall I nimmt Δ mit zunehmender Zylinderspannung ab, und ist selbst bei 80 Volt nicht verschwunden, was also beweist, dass selbst Sekundärelektronen mit grosser Geschwindigkeit (echt oder diffus reflektierte) von der belichteten Platte zurückgehalten werden. Ein entsprechendes Bild erhält man nach den gleichen Schaltschemen für $V_A = 100$ Volt. $I_2/I_1 \cdot 1000$ steigt mit zunehmender negativer Plattenspannung,

nimmt von −20 Volt an Werte grösser als 1000 an und weist bei −75 Volt (d. h. bei 25 Volt Primärgeschwindigkeit) ein Minimum auf. Analog wie bei 50 Volt sinkt Δ im Intervall von 0 bis −8 Volt von 160 Skt. auf 0, behält kleine negative Werte bis −75 Volt,

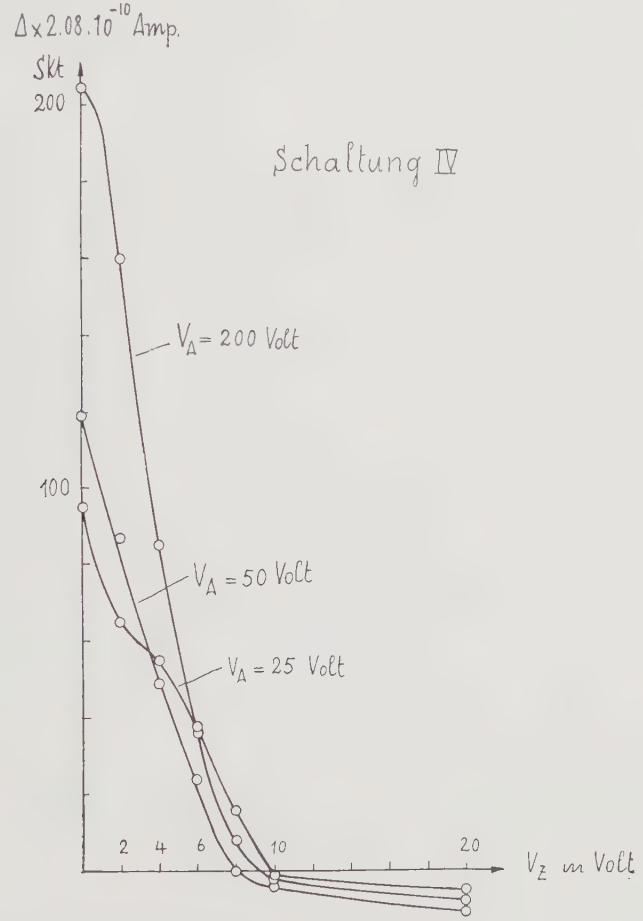

Fig. 10. Beleuchtungseffekt als Funktion der positiven Zylinderspannung (Schaltung III).

um dann nach dem Minimum in der I_2/I_1-Kurve, in ein Maximum bei ca. −80 Volt überzugehen. Für die positiv geladene Platte nimmt Δ im Spannungsintervall von 0 bis 80 Volt von 180 Skt. auf 10 ab.

In Fig. 10 sind die Resultate mit Schaltung III zusammengestellt. Für die Geschwindigkeiten $V_A = 25$, 50, 75, 100, 150

und 200 Volt genügt eine positive Zylinderspannung von ca. 10 Volt um den A-Effekt vollständig zu unterdrücken, in Übereinstimmung mit den Ergebnissen mit Schaltung II. Der Übersichtlichkeit halber sind in Fig. 10 die Kurven für $V_A = 75$, 100 und 150 Volt weggelassen worden. Sie zeigen jedoch genau gleichen Verlauf wie die für 200 Volt.

Auch bei dieser Schaltung wird die Sekundäremission am Zylinder durch die positive Aufladung vermindert, oder es werden die Primärelektronen mit kleiner Geschwindigkeit direkt auf den Auffangzylinder gezogen. Die Kurven für $V_A = 100$, 150 und 200 Volt, erhalten mit Schaltung IV, weisen einen entsprechenden Verlauf auf wie die mit Schema I. Die Geschwindigkeiten $V_A = 25$ und 50 Volt lassen A, nach Schaltung IV, in einem gewissen Spannungsgebiete negativ erscheinen, was weiter unten näher besprochen wird. Für $V_A = 75$ Volt hat die I_2/I_1-Kurve nach Fig. 5 bei -50 Volt ein Maximum. Ein eben solches tritt auch in der A-Kurve an der gleichen Stelle auf. Wie schon erwähnt, ist dieses Verhalten einer Elektronendichteänderung des Primärstrahles im Auftreffpunkt oder einem Raumladungseinfluss zuzuschreiben.

Die an Platte B mit Schaltung II für $V_A = 10$ Volt ausgeführten Messungen schliessen sich denjenigen an der Platte A an. Die I_2/I_1-Kurve zeigt im Spannungsintervall 0 bis -8 Volt einen fast linearen Anstieg von 0,7 auf 1,0. A fällt zuerst (ein Minimum liegt bei -1 Volt), nimmt nachher wieder zu, was erkennen lässt, dass die Sekundäremission bei kleinen Primärgeschwindigkeiten durch das Licht stark beeinflusst wird. Weitere Messungen ($V_A = 50$ Volt) mit sämtlichen vier Schaltungen ausgeführt, bestätigen die Resultate an Platte A.

Die Hysteresiserscheinung ist an der Platte B speziell untersucht worden. Es wird in den folgenden Messungen versucht, diesen Effekt durch Belichten der Platte zu beeinflussen. Die Ergebnisse sind in Fig. 11 dargestellt. Die Kurven 1 und 3 sind ohne Belichtung aufgenommen und lassen die schon bekannte Hysteresiserscheinung erkennen. Die Pfeile in der Figur deuten den Sinn an, in dem die Voltzahlen V_A durchlaufen worden sind. Bei der Aufnahme der Kurven 2 und 4 ist die Lichtklappe während der ganzen Messung dauernd offen geblieben. 2 zeigt nun gegen 1 eine Verschiebung nach links, d. h. der Anstieg der Sekundäremission erfolgt schon bei kleineren Primärgeschwindigkeiten. Vor dem Anstieg in 2 ist auch das Minimum deutlich ausgeprägt. Im Geschwindigkeitsgebiete 68 bis 80 Volt kommt die Kurve 2 höher zu liegen als 1. Ein direkter Übergang von 1 in 2 an dieser

Stelle würde eine Vergrösserung der Sekundäremission durch Belichtung bedeuten. Kurve 4 deckt sich für grosse Geschwindigkeiten beinahe mit 2. Der starke Abfall für 3 und 4 fällt zusammen, was aussagt, dass die Lichtenergie nicht ausreicht die hohe Emission an der Platte noch länger aufrecht zu erhalten. Bei 45 Volt trifft 4 auf 2 und verläuft von da an mit ihr identisch. Das hohe Reflexionsvermögen (Kurve 3) unterhalb 10 Volt wird durch die Belichtung

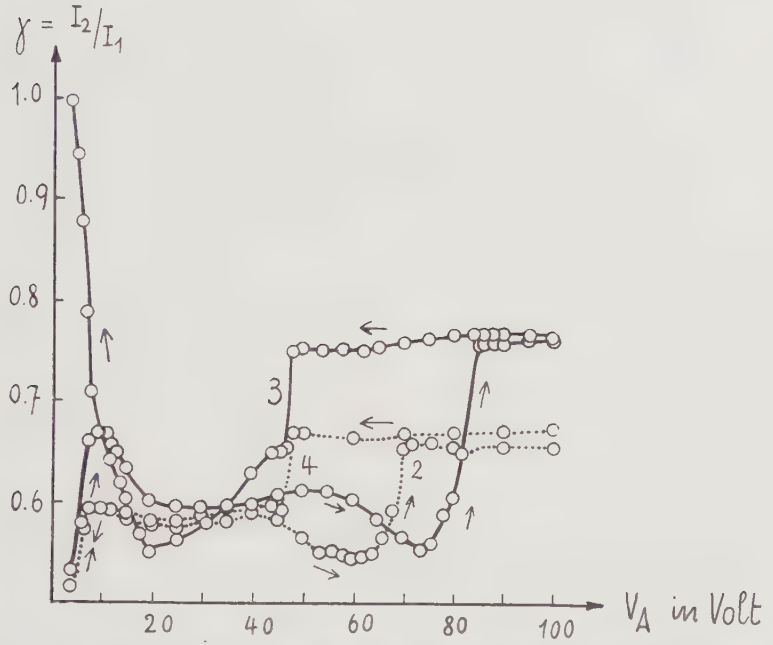

Fig. 11. Hysteresiserscheinung mit und ohne Belichtung. Ausgezogene Kurven ohne, punktierte Kurven mit Belichtung. Die Pfeile geben den Sinn an, indem die Voltzahlen durchlaufen worden sind.

herabgesetzt, was wieder für eine starke Beeinflussung der Reflexion durch das Licht spricht.

In sämtlichen bis jetzt besprochenen Fällen tritt Δ im Sinne einer Verminderung der Sekundäremission auf. Es ist nun auch ein Effekt in Richtung einer Vergrösserung gefunden worden. So zeigt ihn die Platte B kurz nach ihrem Einsetzen in die Röhre. Fig. 12 stellt die Verhältnisse an zwei Messungen dar, wo in den oberen Kurven Δ als Funktion der Primärgeschwindigkeit aufgetragen ist. Es ist ersichtlich, dass Δ nur in einem beschränkten

Geschwindigkeitsgebiete negativ wird, da, wo die γ-Kurve den steilen Anstieg aufweist (untere Kurven Fig. 12). Im vorigen Abschnitte ist gezeigt worden, dass gerade in diesem Gebiete die Kurve, aufgenommen mit andauernder Belichtung, diejenige aufgenommen ohne Bestrahlung, überschneidet. Hier liegt nun der Fall vor, dass schon durch intermittierende Belichtung die obere

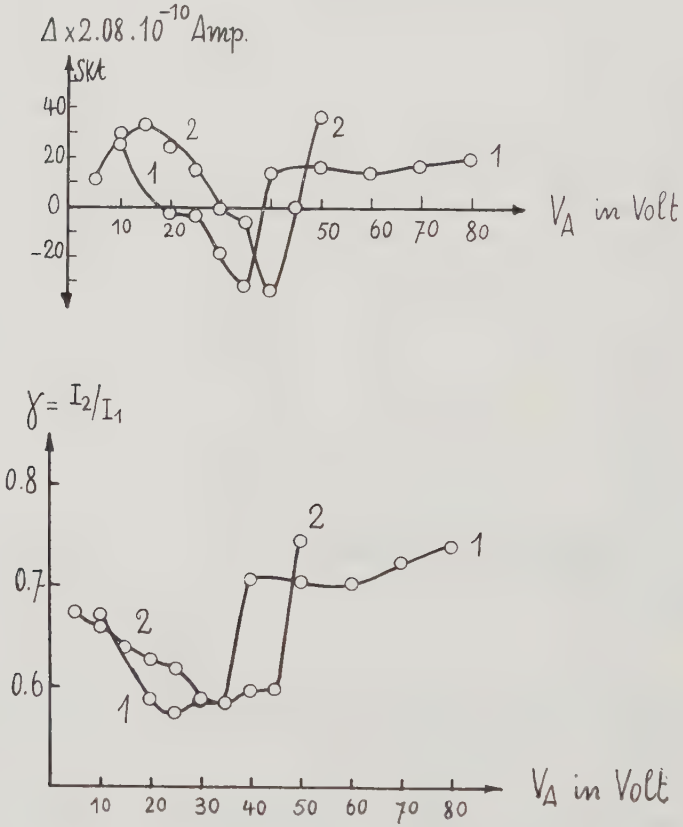

Fig. 12. Negativer Beleuchtungseffekt an Platte *B*.

Kurve 2, Fig. 11, erhalten wird. Nach Schliessen der Lichtklappe muss dann der untere Kurvenpunkt wieder erhalten werden. Aus Fig. 12 entnimmt man ferner, dass sich das Gebiet mit negativem ΔI nach grösseren Geschwindigkeiten verschiebt. Bei der ersten Messung liegt es bei 35 Volt und ist bei der letzten, in der überhaupt noch ein negatives ΔI nachgewiesen werden kann, bei

48 Volt aufgetreten. Hand in Hand damit geht ein Verschieben des steilen Anstieges von γ. Nur bei den ersten fünf an der Platte B ausgeführten Messungen hat sich ein negatives A beobachten lassen und ist dann bei sämtlichen darauffolgenden positiv herausgekommen. Es liegt nun die Vermutung nahe, dass der relativ hohe Gasgehalt der Platte den negativen Beleuchtungseffekt verursacht. Doch lässt nachträglich ein Stehenlassen der Platte während zwei Tagen unter Atmosphärendruck A nie mehr negativ auftreten. Der Effekt im Dember'schen Sinne ist deshalb einer speziellen Struktur der mit NaOH vorbehandelten Oberfläche zuzuschreiben, die nach den hier angestellten Versuchen nicht näher übersehen werden kann.

Auch an der Platte A tritt bei Messungen, angestellt mit Schaltung IV, für die Geschwindigkeiten $V_A = 25$ und 50 Volt,

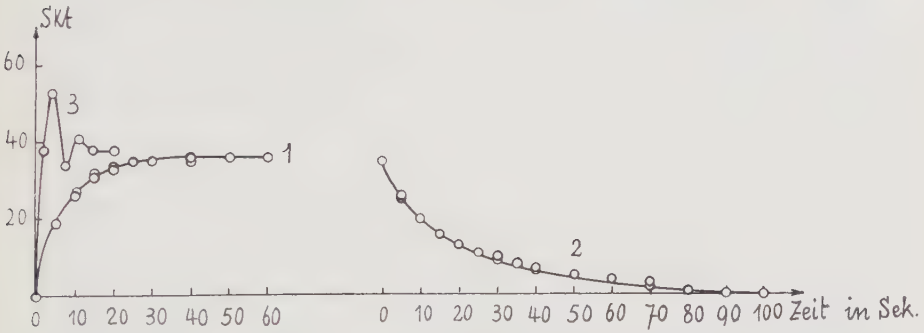

Fig. 13. Einstellen und Abklingen des Beleuchtungseffektes an Platte A.

A negativ auf. Bei $V_A = 50$ Volt stimmt das negative A mit dem Maximum der γ-Kurve (3, Fig. 5) bei -26 Volt Zylinderspannung überein. Für $V_A = 25$ Volt weist A bei -16 Volt seinen grössten negativen Wert auf, d. h. an der Stelle, wo in der Geschwindigkeitsverteilungskurve (2, Fig. 5) der Sekundärelektronen der steile Abfall liegt. Inwiefern hier Raumladungserscheinungen oder eine Elektronendichteänderung im Plattenauftreffpunkt einen negativen Beleuchtungseffekt erzeugen, lässt sich nicht übersehen.

Es sei noch auf eine Eigentümlichkeit des positiven A-Effektes hingewiesen. Die Einstellung des neuen Stromwertes nach Öffnen der Lichtklappe geschieht nicht momentan, sondern es vergehen ca. 40 Sekunden bis der maximale Wert eingestellt ist. Fig. 13 zeigt für zwei Messungen die Einstell- und Abklingwerte (Kurve 1

und 2). Es dauert ca. 90 Sekunden, bis der Effekt ganz abgeklungen ist. Die Einstellzeiten verkleinern sich mit grösser werdendem Δ, doch sind Zeiten unter 25 Sekunden nie gemessen worden. Es sind daher sämtliche Messungen des Beleuchtungseffektes wie folgt ausgeführt worden: zuerst wird I_2 und I_3 abgelesen, sodann die Lichtklappe geöffnet und nach einer Minute die Ablesung „mit Belichtung" gemacht. Hierauf schliesst man die Klappe und es werden nach 2 Minuten die Anfangswerte I_2 und I_3 ohne Belichtung nachkontrolliert (Methode der intermittierenden Belichtung).

Dass die langsame Einstellung des Beleuchtungseffektes nicht etwa der Trägheit des Messinstrumentes zuzuschreiben ist, zeigt Kurve 3 der Ausschläge, die erhalten werden, wenn man die gleichgrosse Stromänderung Δ durch spontane Änderung der Glühemission erzeugt. Schon nach 1,8 Sekunden läuft die Zahl der Endeinstellung durch das Fadenkreuz der Spiegelablesung. Die Trägheit ist somit einzig und allein in der Natur des Effektes zu suchen. Die Endwerte im negativen Δ-Effekt stellen sich viel rascher ein. Quantitative Messungen dieser Zeiten liegen nicht vor.

§ 4. Diskussion der Messresultate.

a) Sekundäremission ohne Beleuchtung. Für die Elektronengeschwindigkeiten 0 bis 250 Volt liegen Messungen der Sekundäremission an Al von Farnsworth[1]) vor. Dort wird gezeigt, dass schon bei 50 Volt $\gamma = I_2/I_1$ grösser als 1 wird. Bei den Messungen hier ist γ im Maximum 0,9. Doch erreicht man durch Anlegen einer negativen Spannung an die Platte (Schaltung II) für grosse Primärgeschwindigkeiten, z. B. 150 Volt, dass γ die Einheit etwas überschreitet (1,1). Als Gründe für das zu kleine γ sind anzuführen: störende Sekundäremission am Auffangzylinder und andere Oberflächenbeschaffenheiten als bei Farnsworth (grosse Austrittsarbeit). Wie die Geschwindigkeitsverteilungskurven der Sekundärelektronen zeigen, ist die Elektronenreflexion an der Platte A für kleine Primärgeschwindigkeiten, z. B. 25 Volt, deutlich ausgeprägt und macht für Geschwindigkeiten oberhalb des steilen Anstieges in der γ-Kurve, z. B. 75 Volt, einer echten Sekundäremission Platz. Das dazwischenliegende Minimum in der γ-Kurve (2, Fig. 3) deutet auf eine grosse Austrittsarbeit der Sekundär-

[1]) H. E. Farnsworth: Phys. Rev. **25**, 41, 1925.

elektronen hin, indem dieselben anfänglich, infolge ihrer kleinen Geschwindigkeit, von der Platte zurückgehalten werden. Die Breite dieses Minimums verändert sich mit der Vorbehandlung der Platten und ist am kleinsten an *A*, am grössten an *C*. Im letzteren Falle ist die Platte mit einer weissen Krystallschicht überzogen, sodass die Sekundäremission in der Hauptsache am CsCl zustande kommt. Die reine Al-Platte hat auch für das ganze Geschwindigkeitsgebiet das grösste Sekundäremissionsvermögen.

Die in Tabelle 1 zusammengestellten Resultate bestätigen die schon bekannte Proportionalität zwischen Sekundär- und Primärstrom. Die gute Erfüllung dieser Beziehung bringt zum Ausdruck, dass an der Platte *A* die Oberfläche während der Dauer der Messung sich nicht verändert hat.

An allen drei Platten lässt sich eine Hysteresiserscheinung nachweisen, die aussagt, dass es für die Aufnahme der Sekundäremission nicht gleichgültig ist, ob man von kleineren Geschwindigkeiten zu grösseren übergeht, oder umgekehrt. Ähnliche Erscheinungen sind in der Literatur bekannt. Es sei z. B. auf die Hysterese am *niedervoltigen Lichtbogen*[1]) verwiesen. Während dort diese Erscheinung bei einem Druck von 5 mm Hg auftritt, wird sie hier im Hochvakuum gefunden ($p < 10^{-6}$ mm Hg.). Die Messresultate an der Platte *B* lassen folgende Deutung zu: Die Energie der 75 Volt Elektronen reicht aus, die Plattenoberfläche durch lokale Temperaturerhöhung (thermische Deutung) so zu verändern, dass die Sekundäremission stark vergrössert wird (Herabsetzung der Austrittsarbeit). Wird nun die γ-Kurve in Richtung fallender Voltzahlen durchlaufen, so kann dieser Zustand erhöhter Emission noch durch Elektronen mit einer Geschwindigkeit kleiner als 75 Volt aufrecht erhalten werden. Nachdem der Abfall bei 48 Volt erfolgt ist, weist die Platte gegenüber dem Anfangszustande noch eine andauernde Veränderung der Plattenoberfläche auf, da sich die Kurven 1 und 2 in Fig. 4 nicht decken. Erst ein Stehenlassen der Platte über Nacht im Vakuum lässt den ursprünglichen Zustand wieder herstellen. Der Umstand, dass für ein und dieselbe Elektronengeschwindigkeit mehrere Sekundäremissionszustände möglich sind, erschwert das Reproduzieren, sowie das Vergleichen der γ-Werte untereinander.

Vermindert man den Primärstrom von $1{,}6 \cdot 10^{-7}$ auf $8 \cdot 10^{-9}$ Amp., so ergibt sich eine Verschiebung der Hysteresisfläche um 10 Volt nach kleineren Geschwindigkeiten. Nach der thermischen

[1]) R. Bär, M. v. Laue und E. Meyer: Zs. f. Phys. **20**, 83, 1923.

Deutung der Erscheinung erwartet man gerade das Gegenteil. Inwiefern aber eine Verminderung des Primärstromes eine Änderung der Elektronendichte an der Auftreffstelle der Platte bewirkt, die allein massgebend für die Erwärmung der Oberfläche ist, lässt sich an der Apparatur hier nicht prüfen. Möglicherweise spielt auch eine Raumladungsänderung hier mit. Eine Andeutung auf das Vorhandensein einer Raumladung zeigt das Verschwinden des Minimums vor dem Anstieg in der γ-Kurve bei 75 Volt (1, Fig. 4), wenn der Zylinder gegenüber der Platte auf + 8 Volt gebracht wird.

Die Grösse und Lage der Hysteresisfläche hängt im hohen Grade von der Vorbehandlung der Platten ab. Platte *C* zeigt die grössten Verschiebungen. Ob eine solche Hysteresiserscheinung nur einer Gas enthaltenden Platte zuzuschreiben ist, lässt sich hier nicht entscheiden. Es bleibt ferner die Frage offen, ob diese Erscheinung nur dem Al-Metall zukommt.

b) Sekundäremission mit Belichtung. Da der Beleuchtungseffekt nicht in dem erwarteten Sinne (Dember[1])) eintritt, sind zuerst alle Möglichkeiten zu diskutieren, die das Auftreten des Effektes im gefundenen Sinne erklären können. Isolationsfehler und reiner Photoeffekt am Zylinder scheiden infolge der Kleinheit dieser Ströme als Deutung aus. Da Raumladungsstörungen durch positive Ionen trägheitsfrei verlaufen und Δ mit wachsendem Gasdrucke nicht zunimmt, muss auch von dieser Erklärung abgesehen werden. Dass durch Belichtung eine Verkleinerung der Zahl der direkt auf den Zylinder fallenden Elektronen auftreten kann, scheint wohl kaum möglich. Ferner gelingt es nicht, ein Aussenden von positiven Ionen an der Platte durch Belichtung nachzuweisen. Es bleiben somit nur zwei Möglichkeiten übrig: entweder entsteht der Dember-Effekt am Zylinder, da auch dort infolge ungenügender Ausblendung Licht auftrifft, oder aber die Sekundäremission an der Al-Platte wird tatsächlich vermindert. Da der Zylinder zur Herabsetzung des reinen Photoeffektes vor dem Einsetzen in die Röhre mit NaOH behandelt worden ist, liegt die Vermutung nahe: das Auftreten des Dembereffektes sei dieser Vorbehandlung zuzuschreiben. Wird dieser Zylinder durch einen aus reinem, unvorbehandeltem Al ersetzt, so ändert sich die Richtung des Beleuchtungseffektes nicht. Dass sich an der mit NaOH vorbehandelten Platte der Effekt nicht umkehrt, entscheidet zur Auffassung: die Belichtung erzeugt

[1]) H. Dember, l. c.

eine *Verminderung* der Sekundäremission. Eine solche Verminderung ist nun auch von RUDBERG[1]) gefunden worden. Er macht seine Versuche an einer Pt-Folie. Ist diese vollständig entgast, so tritt kein Effekt auf. Erst nachdem die Platte im Vakuum etwas Gas aufgenommen hat, setzt die Verminderung der Sekundäremission beim Belichten wieder ein. Die hier an der nicht entgasten Al-Platte ausgeführten Messungen stehen in keinem Widerspruche zu denjenigen von Rudberg und ergänzen sie in mancher Richtung.

An der Platte A ist Δ für kleine Sekundärströme proportional I_2 (V_A = konst.), und zwar stimmt diese Beziehung umso besser, je grösser die auffallende Lichtenergie ist. Für grosse Sekundärströme geht Δ einem Sättigungswerte entgegen, der mit wachsender Lichtenergie zunimmt, d. h. eine gewisse Lichtmenge vermag nur eine begrenzte Anzahl von Sekundärelektronen zu beeinflussen. Die gleiche Gesetzmässigkeit hat auch Dember an seinem Effekte gefunden.

Im Geschwindigkeitsgebiete von 30 bis 200 Volt lässt sich Δ, für konstantes I_2, als lineare Funktion von γ darstellen. Der Zusammenhang ist folgender: Aus der experimentellen Tatsache, dass durch eine positive Aufladung des Zylinders auf 10 Volt der Beleuchtungseffekt zum Verschwinden gebracht wird, muss geschlossen werden, dass im Geschwindigkeitsgebiete von $V_A = 25$ bis 200 Volt der Beleuchtungseffekt nur solchen Elektronen zuzuschreiben ist, die mit einer Geschwindigkeit kleiner als 10 Volt auf die Platte treffen. Die Entstehung solcher langsamer Elektronen ist auf zwei Arten möglich. Einmal lösen die Primärelektronen, die auf die Wandung des Röhrchens R (Fig. 1) stossen dort Sekundärelektronen aus, die nun als Primärelektronen mit kleiner Geschwindigkeit auf die Platte gelangen. Das andere Mal rufen die Sekundärelektronen der Platte, wenn sie auf den Zylinder kommen, an demselben eine Sekundäremission hervor. Diese Zylindersekundärelektronen erreichen zum Teil wiederum die Platte und haben da die Bedeutung von Primärelektronen mit kleiner Geschwindigkeit. In beiden Fällen verhindert eine Aufladung des Zylinders auf 10 Volt diese Elektronen am Auftreffen auf die Platte. Da die Zahl dieser Elektronen nach Massgabe der Sekundäremission mit steigender Primärgeschwindigkeit zunimmt, lässt sich der lineare Anstieg des Beleuchtungseffektes mit der Sekundäremmission verstehen. Die Sekundäremission dieser

[1]) E. RUDBERG, l. c.

langsamen Elektronen besteht aus echt reflektierten Elektronen. Es ist somit der Reflexionsvorgang durch die Belichtung stark zu beeinflussen.

Auch aus Tabelle 3 ist ersichtlich, dass bei kleiner Anodenspannung die Sekundäremission stark beeinflussbar ist. Hier sind ebenfalls die von der belichteten Platte zurückgehaltenen Elektronen echt reflektierte. Ganz allgemein können nur solche Elektronen den Δ-Effekt ausmachen, die ohne Belichtung der Platte auf den Zylinder fallen, mit Belichtung jedoch nicht mehr. Da nach der Kurve links (Fig. 9, positive Platte) die Sekundäremission im hohen Gegenfelde noch einen Beleuchtungseffekt aufweist, heisst, dass die an der Platte echt oder diffus reflektierten Elektronen durch die Belichtung beeinflusst werden. Zusammenfassend lässt sich also für die Platte *A* aussagen, dass nur die *echt* und *diffus reflektierten* Elektronen einen *Beleuchtungseffekt* aufweisen, in dem Sinne, dass die Bedingungen zur Reflexion ungünstiger gestaltet werden.

Will man diese Beziehungen auf die Platte *B* anwenden, so stösst man auf einige Schwierigkeiten; denn hier liegen die Verhältnisse komplizierter. In der Δ-Kurve (5, Fig. 9) treten zwei Stellen auf, wo Δ verschwindet. Es ist wohl kaum anzunehmen, dass gerade an diesen beiden Orten die Bedingungen, die einen Δ-Effekt im obigen Sinne ermöglichen, fehlen. Vielmehr spielt hier eine Veränderung der Oberflächeneigenschaften mit, besonders an der Nullstelle bei 67 Volt. Diese Stelle liesse sich auch als Überlagerung des positiven und negativen Δ-Effektes deuten. Dass man zu dieser Auffassung eine gewisse Berechtigung hat, zeigt folgende Beobachtung: Wird die Lichtklappe geöffnet, so schlägt das Galvanometer zuerst ohne Trägheit im Sinne einer Vergrösserung der Sekundäremission aus (5 bis 10 Skt.), um dann langsam auf eine Zahl zu wandern, die einem positiven Δ-Effekt entspricht.

Die träge Einstellung des Beleuchtungseffektes weist auf die Deutung der Erscheinung im thermischen Sinne hin, was auch Rudberg in seiner Arbeit hervorhebt. Unterstützt wird diese Auffassung noch durch die Verschiebung, die die γ-Kurve mit steigenden Voltzahlen erleidet, wenn die Platte belichtet wird. Da der negative Δ-Effekt sich in kürzerer Zeit einstellt, muss er von anderer Natur sein als der positive.

Um eventuell einen Anschluss an die Langmuir'sche Arbeit zu bekommen, ist die Al-Platte noch mit CsCl behandelt worden. Doch zeigen schon die ersten Messungen, die an ihr gemacht

worden sind, dass hier die Verhältnisse ganz anders liegen. Ein Beleuchtungseffekt tritt nie auf. Durch Elektronenbombardement lassen sich die Oberflächeneigenschaften andauernd verändern. Ein Beleuchtungseffekt wird somit nur da gefunden, wo das Al als Metallatom oder als Bestandteil einer Verbindung auftritt.

§ 5. Zusammenfassung.

An zwei nicht entgasten Al-Platten, von denen die eine mit NaOH vorbehandelt ist, wird bei Belichtung mit der integralen Strahlung einer Quarzquecksilberamalgamlampe ein Effekt gefunden, der sich als Verminderung der Zahl der echt und diffus reflektierten Primärelektronen deuten lässt *(Beleuchtungseffekt)*. Es ergeben sich für die reine Al-Platte folgende Gesetzmässigkeiten:

a) Für konstante Primärgeschwindigkeit ist der Beleuchtungseffekt anfänglich proportional dem Sekundärstrome und geht nachher einem Sättigungswerte entgegen.

b) Dieser Sättigungswert steigt mit wachsender Lichtintensität.

c) Für konstanten Sekundärstrom ist der Beleuchtungseffekt proportional der Sekundäremission (Verhältnis von Sekundär- zu Primärstrom).

d) Der Beleuchtungseffekt erweist sich in einem Druckintervalle von $p = 10^{-3}$ bis $p < 10^{-6}$ mm Hg als vom Gasdrucke unabhängig.

e) Der Endwert des Beleuchtungseffektes stellt sich erst nach 40 Sekunden ein. Die Abklingungszeit beträgt 90 Sekunden.

Die Kurven der Sekundäremission, aufgetragen als Funktion der Primärgeschwindigkeit, zeigen eine Verschiebung, wenn sie das eine Mal von kleinen zu grossen, das andere Mal von grossen zu kleinen Geschwindigkeiten aufgenommen werden *(Hysteresiserscheinung)*. Durch Belichten der Platte lässt sich diese Erscheinung beeinflussen, indem der Anstieg in der Kurve mit Beleuchtung bei steigenden Voltzahlen früher erfolgt.

In speziellen Fällen (Plattenvorbehandlung und bei Anwendung von Hilfsspannungen) tritt auch ein Beleuchtungseffekt in Richtung

einer Vergrösserung der Sekundäremission ein. Er stellt sich trägheitslos ein und ist von anderer Natur als der obige.

Diese Arbeit ist unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. A. Hagenbach ausgeführt worden. Ich möchte nicht versäumen, meinem verehrten Lehrer an dieser Stelle für das fördernde Interesse an derselben aufs herzlichste zu danken.

Basel, Physikalisches Institut der Universität.

Curriculum vitae.

Ich, Ernst August Frey, wurde am 28. März 1901 als Sohn des Ernst Frey, Kaufmann, und seiner Gattin Elisabeth, geborene Kramer, in Basel geboren, wo auch meine Eltern heute noch leben.

Von 1907 bis 1919 besuchte ich die Basler öffentlichen Schulen und bestand im September 1919 an der Obern Realschule das Maturitätsexamen. Nach erfolgter Immatrikulation an der Universität Basel widmete ich mich dem Studium der Chemie, Physik und Botanik und später noch der Mathematik. Dabei besuchte ich Vorlesungen und Praktika der Dozenten: A. L. Bernoulli, A. Buxtorf, F. Fichter, A. Hagenbach, W. Matthies, H. Mohrmann, A. Ostrowski, H. Rupe, O. Spiess, A. Schmid, O. Schüepp, G. Senn, L. Zehnder und H. Zickendraht.

Im Winter 1921/22 wendete ich mich dem Studium der Physik zu. Dieses Semester verbrachte ich in Leipzig und hörte bei den Dozenten: J. Bauschinger, Th. Des Coudres, G. Jaffé, M. Le Blanc, E. Marx, L. Schiller, E. Schnee und O. Wiener. Im Sommer 1922 kehrte ich wieder nach Basel zurück. Seit September 1927 versehe ich die Stelle eines Assistenten an der Physikalischen Anstalt.

Die vorliegende Arbeit wurde im Winter 1925 begonnen und unter der Leitung von Prof. Dr. A. Hagenbach ausgeführt. Ich möchte an dieser Stelle nicht versäumen, meinen Lehrern für die vielen Anregungen, die sie mir gegeben haben, meinen Dank auszusprechen. Insbesondere möchte ich Herrn Prof. Dr. A. Hagenbach für das Interesse danken, das er mir während der Ausführung dieser Arbeit entgegengebracht hat. Ferner danke ich meinem Freunde Dr. M. Wehrli, Assistent an der Physikalischen Anstalt, für das stets fördernde Interesse, das er mir während meiner Studienzeit bewahrte.